

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22686078

研究課題名（和文） 光学CTマイクロフォンを用いた超音速ジェット騒音の3次元高解像音源探査

研究課題名（英文） Three-Dimensional Investigation of the Sound Sources with a High Spatial Resolution in Supersonic Jet Noise Using the Optical CT Microphone

研究代表者

荒木 幹也 (ARAKI MIKIYA)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70344926

研究成果の概要（和文）：

本研究では、「音」の計測に「光」を用いる。「音」は圧力変動であり場の密度も同時に変動する。この密度変動を光の屈折により検出する。ここに「CT技術」を融合することで、ジェット騒音源を高空間分解能で非接触に3次元断層可視化する「光学CTマイクロフォン」開発を行った。複雑な3次元形状を有するエアロスパイクノズルから噴出する超音速ジェットに着目し、音源構造の特定ならびに騒音放射との因果関係を詳細に調査した。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, 'light' is applied to 'acoustic' measurements. 'Acoustic wave' is a pressure oscillation, and the density fluctuates at the same time. Here, a CT (computed tomography) is applied to the optical technique, and the 'optical CT microphone' is developed, which realizes non-intrusive and three-dimensional measurements with a high spatial resolution. An aerospike nozzle with a complicated three dimensional configuration is tested, and the relationship between the source structure of the jet noise and their acoustic radiation was investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：ジェットエンジン

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ジェット騒音，音源探査，非接触計測，CT，シュリーレン，騒音低減

1. 研究開始当初の背景

超音速ジェット騒音低減法開発において、「音源」の「位置」と「規模」を正確に把握することが必須の課題である。しかしながら、従来のマイクロフォンを流れに挿入するだけでは、流れを乱し新たな騒音を発生してし

まう。本研究では、「音」の計測に「光」を用いる。「音」は圧力変動であり、場の密度も同時に変動する。この密度変動を、光の屈折により検出する。ただし、ここで得られる情報は音響場を透過してきた信号であり、光路上の全ての変化の積分値が計測される。そ

の内部構造は不明のままである．ここに「CT技術」を融合することで，ジェット騒音源を「高空間分解能」で「非接触」に「3次元断層可視化」する「光学CTマイクロフォン」開発を行う．この光学CTマイクロフォンを，複雑な3次元形状を有するエアロスパイクノズルに適用し，音源探査の可能性について検討を行うものである．

2. 研究の目的

拡大する世界の航空需要を満たすため，世界各国で次世代超音速輸送機の開発が進められている．騒音低減を効果的に行うためには，その音源の位置と強度を正確に知ることが肝要である．しかし，ジェット騒音は音源がジェット内部に存在するため，直接の音源特定は困難である．そのため，ジェット騒音の騒音源探査には一般的にマイクロフォンアレイが用いられるが，空間分解能に劣るといふ欠点もある．

本研究において提案する光学CTマイクロフォンでは，圧力変動に伴う密度変動をシュリーレン光学系を用いて非接触で計測する．そのため，従来音響計測が困難であったジェット内部，あるいはその近傍での音響計測が可能であり，高空間分解能での騒音源特定が可能になると期待される．本研究では，ジェット内部の密度変動をシュリーレン光学系を用いて断層可視化する．また，遠方場のマイクロフォンでとらえられた騒音波形との相互相関解析を行う．さらにその結果にジェット内部の密度変動振幅を考慮することで，正確な音源位置と音源強度を明らかにする．

3. 研究の方法

実験に供したエアロスパイクノズルは，ランプ，カウル，側壁の各部品により構成されている．ノズルスロート上流の流路はストレートで，幅20 mm，高さ7.5 mmである．ノズルスロートの寸法は，幅20 mm，高さ2.8 mmである．ノズルスロート高さを H ，ノズル幅を W とおく．カウル出口を通過した空気はランプに沿って流れ，ランプ下流端から静止大気に噴出する．座標系はカウル下流端中央を原点とし，流れ方向に x 軸，鉛直下向き方向に y 軸，スパン方向に z 軸とする．ノズル入口全圧は0.27 MPa(a)，ノズル出口静圧は大気圧である．ノズル圧力比は2.7である．ジェットの全温は室温である．また作動流体は燃焼ガスではなく空気である

マイクロフォン (BK, 4939 および 4138) を用い，騒音計測を行った．計測角度は空気取り入れ口からの角度 θ_{inlet} により定義する．マイクロフォンからの電圧信号は，デジタルオシロスコープ (LeCroy, WR6030A および 64Xi-A) で A/D 変換され記録される．サンプリングクロックは $1 \mu s$ である．マイクロ

フォンの設置位置は図3のとおりである．マイクロフォンによる音響計測と後述するシュリーレン光学系による密度変動計測を同時に行った．本研究では 60 kHz までのデータを有効とした．

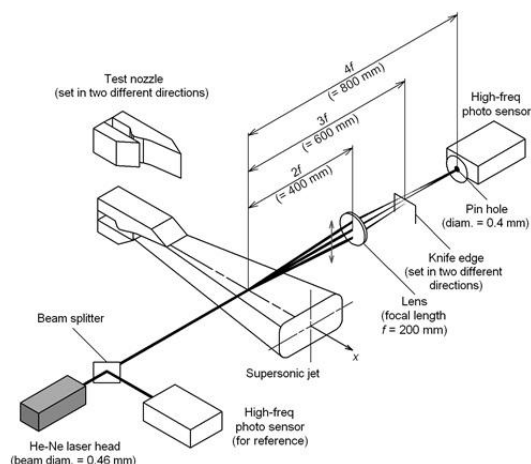


図1 シュリーレン光学系概略

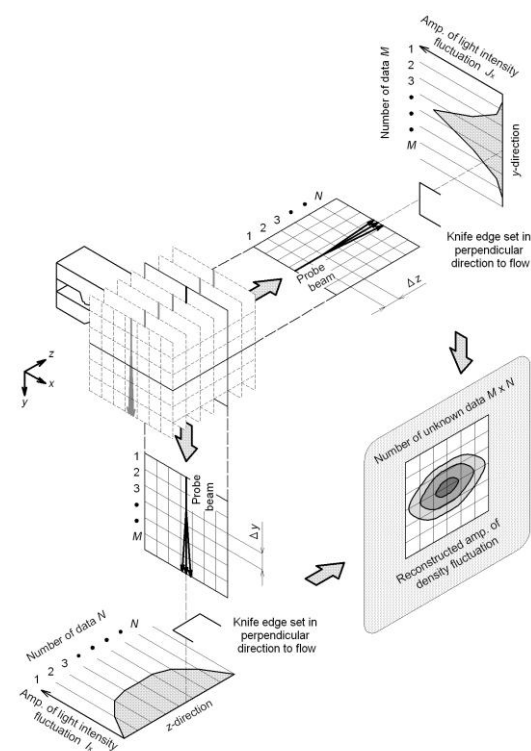


図2 断層像再構成概略

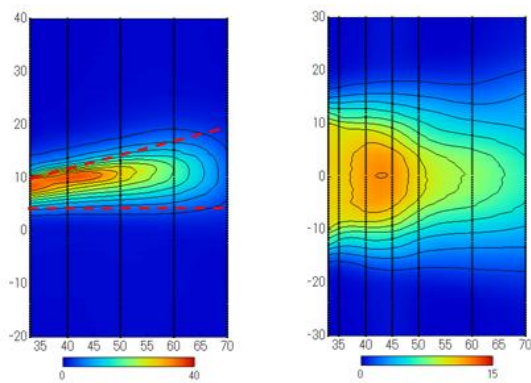
図1にシュリーレン光学系概略を示す．光源は CW He-Ne レーザ (MellesGriot, 05LHP211) を用いた．波長は 632.8 nm である．レーザビーム径は 0.46 mm である．レーザビームがジェットを通過後 400 mm の位置に焦点距離 200 mm の凸レンズ (実際は凹面鏡) を設置する．レーザビームが凸レンズを通過後，200 mm の位置にナイフエッジを設置

する。密度勾配によりレーザービームが屈折し、焦点の位置が移動する。ナイフエッジでこの一部をカットすることでレーザービームの屈折角を輝度の変動量として取得する。

ナイフエッジ通過後 200 mm の位置に、直径 0.4 mm のピンホールの開いたスクリーンを設置し、レーザービームの一部のみ通過させ測定領域を限定する。このピンホール径 0.4 mm が本計測法の空間分解能である。ピンホールを通過したレーザー光は高速フォトセンサ（浜松ホトニクス，S7031）で受光され、電圧信号に変換される。出力信号はデジタルオシロスコープ（LeCroy，64Xi-A）で A/D 変換され記録される。サンプリングクロックは $1 \mu s$ である。取得された電圧信号は 32768 点ごとに 30 回に分けて高速フーリエ変換され、その平均から輝度振幅の周波数分布が求まる。計測位置を 0.5 mm 間隔で変化させ、各位置での輝度振幅の周波数分布を求める。

図 2 に断層像再構成の概略を示す。ノズルに対するレーザー光の入射方向を変え、y 軸上および z 軸上の輝度変動分布を取得する。この 2 方向のデータをもとに各 x 座標での断層像を再構成する。再構成の計算には ML-EM 法（最尤推定 - 期待値最大化法）を用いた。

シュリーレン光学系により計測された輝度の時間波形とマイクロフォンにより計測された音圧の時間波形から、マイクロフォン同士あるいはシュリーレン光学系とマイクロフォンとの相互相関解析を行った。マイクロフォンの有効周波数から、また低周波の外乱の影響を除くため、1 kHz ~ 60 kHz のバンドパスフィルタを通したのち相関関数を算出した。

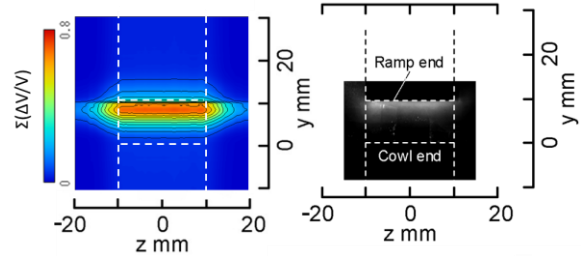


(a) x-y 平面 (b) x-z 平面
図 3 輝度変動振幅等高線

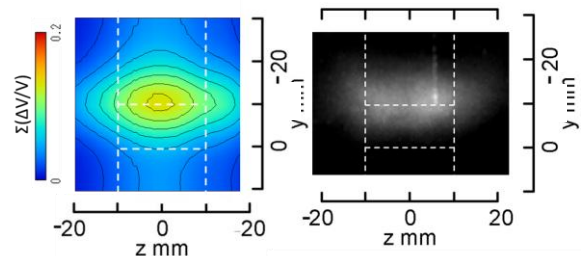
4. 研究成果

図 3(a) に x-y 平面、図 3(b) に x-z 平面における輝度変動振幅等高線を示す。横軸は x 座標、縦軸は y 座標または z 座標である。なお、図 3(a) 中の赤い破線はピトー管による

流速計測によって求めたジェット境界を表している。輝度変動はジェット外部においても検出されることが確かめられる。これは静止大気を伝播する圧力変動、すなわち音波そのものであると考えられる。



(a) $x = 33 \text{ mm}$



(b) $x = 70 \text{ mm}$

図 4 輝度振幅断層像と瞬間ミー散乱像比較

図 4(a) に $x = 33 \text{ mm}$ 、図 4(b) に $x = 70 \text{ mm}$ の輝度振幅断層像及び瞬間ミー散乱によるジェットの可視化像を示す。比較するといずれもジェットの位置と形状が捉えられている。これより再構成の結果は妥当であると考えられる。断層像再構成により、ジェット中心部に周囲より変動の大きな領域があること、また下流へ行くに従いジェットの形状が矩形から円形へ近づいていくことが確認された。

このように、光学 CT マイクロフォンを用いることで、ジェット内部の構造を非接触で断層可視化可能となる。また、空間分解能は 1mm 以下であり、従来のマイクロフォンアレイ法と比較して極めて高精細な画像の取得が可能となった。

図 5 に各マイクロフォンに対する輝度変動の相関関数の最大値の等高線を示す。全て横軸は x 座標、縦軸は y 座標である。噴流外部に大きな相関の山ができるのは、音波の伝播によるものと考えられる。図中右斜め上方向に相関が大きい領域が現れる。図 5 から、Large-turbulence structure によって発生した音波がジェットの下流約 150 度方向へ極めて高い指向性をもって伝播していく様子が見えてくる。またこの相関値はマイクロ

ソンの角度が大きくなるほど増大するが、これはそのマイクロフォンの方向に向かって伝播してきた音そのものとの相関が取れるためである。

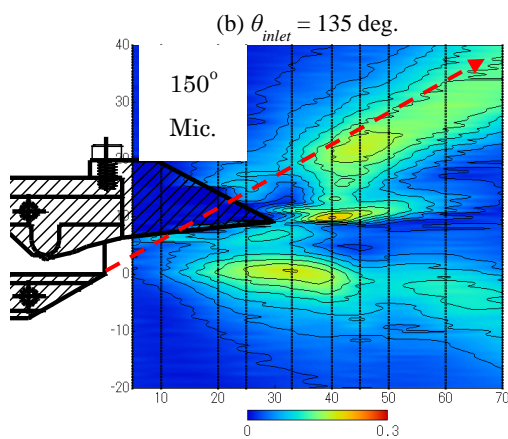
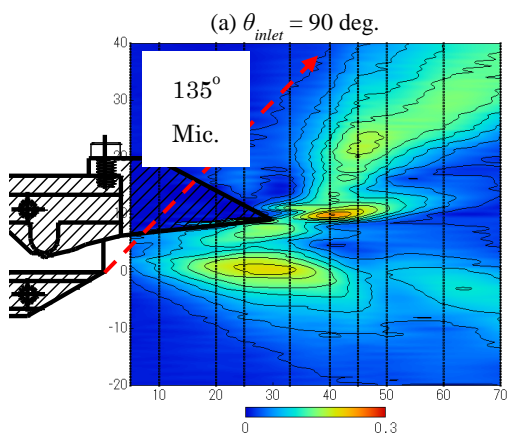
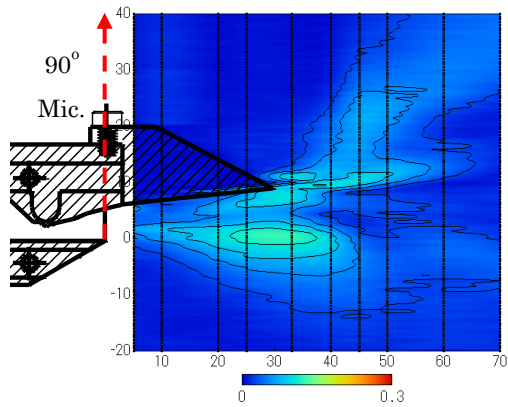


図5 ランプ側最大相関値等高線

図6に騒音源強度等高線を示す。横軸は x 軸、縦軸は y 軸である。相関値は波形の相似の度合を示すものであり、振幅の大小は影

響しない。従って相関値の大小は必ずしも騒音源の強度の大小を示さない。そのため、各計測座標における輝度変動振幅と相互相関のピーク値の積の分布を求め、騒音源の強度を検討する。

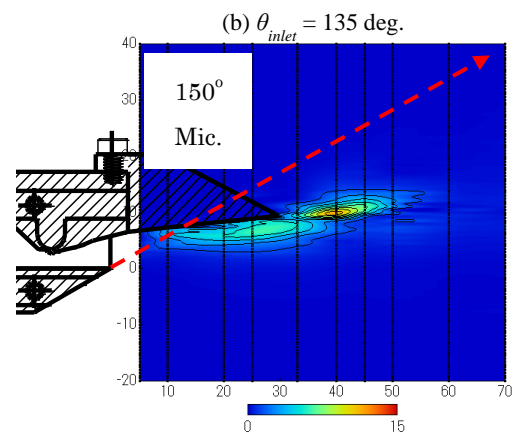
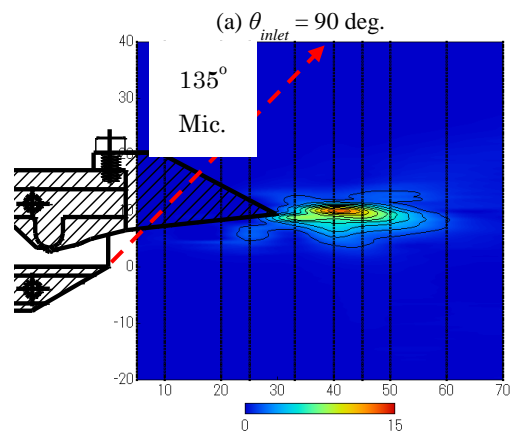
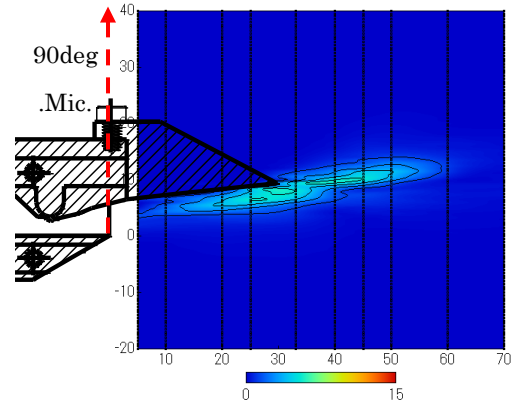


図6 ランプ側音源強度等高線

図6から言えることは、比較的大きな値を示す領域がランプ下流端、カウル出口からランプ壁面の2か所に限定されることである。各々の騒音計測角度でそれぞれの領域にお

ける値は異なる。90度マイクロフォンではランプ壁面の値が大きく、150度マイクロフォンではランプ下流端の値が大きくなることを示している。また、図5(b)から、最も騒音の大きいランプ側135度マイクロフォンに対しては、ほとんどランプ下流端でしか値が出ないことがわかる。この結果はそれぞれのマイクロフォンで計測される騒音の音源位置、および寄与の大小を表していると考えられ、ランプ側135度のマイクロフォンの主要音源はランプ下流端部にあると言える。しかしながら、他のマイクロフォンで計測されるジェット騒音について、それぞれの音源がどの程度の割合で寄与しているのかという点については、今後さらなる検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 村木瑞穂, 荒木幹也, 小島孝之, 田口秀之, 志賀聖一, "スリット噴射が矩形極超音速ノズルからの排気騒音に及ぼす影響", 日本航空宇宙学会論文集, 2013, 査読有, 掲載決定.
- ② Mikiya ARAKI, Masahiro TSUKAMOTO, Takayuki KOJIMA, Hideyuki TAGUCHI and Seiichi SHIGA, "Thrust Measurement of a Rectangular Hypersonic Nozzle Using an Inclined Baffle Plate", Journal of Propulsion and Power, November, 2012, Vol. 28, No. 6, pp.1258-1267. 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 森田康平, 高橋康拓, 荒木幹也, 小島孝之, 田口秀之, 志賀聖一, "光学CTマイクロフォンを用いた矩形極超音速ノズルのジェット騒音音源探査" 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, 2013年3月4日~2013年3月5日, 倉敷, CD-Rom.
- ② 村木瑞穂, 荒木幹也, 小島孝之, 田口秀之, 志賀聖一, "スリット噴射が矩形極超音速ノズルからの噴流発達と騒音放射に及ぼす影響", 第53回航空原動機・宇宙推進講演会, 2013年3月4日~2013年3月5日, 倉敷, CD-Rom.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木 幹也 (ARAKI MIKIYA)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70344926